

PEDOBAROGRAFIJA KAO SUVREMENA METODA U DIJAGNOSTICI STOPALA

Pedobarography as a modern method in foot diagnostics

AZRA TOJAGA^{1,2}, MIRSAĐ MUFTIĆ^{3,4}, MAJA CRNOV^{1,2},
VEDRANA GRBAVAC^{1,2}, IVANA GRLE^{1,2}

¹ Fakultet zdravstvenih studija, Sveučilište u Mostaru, Mostar, Bosna i Hercegovina

² Sveučilišna klinička bolnica Mostar, Klinika za fizikalnu medicinu i rehabilitaciju, Mostar, Bosna i Hercegovina

³ Fakultet zdravstvenih studija, Univerzitet u Sarajevu, Sarajevo, Bosna i Hercegovina

⁴ Centar za rehabilitaciju MHS, Sarajevo, Bosna i Hercegovina

SUSTAVNI PREGLED / SYSTEMATIC REVIEW

e-mail adresa autora: azra.tojaga@fzs.sum.ba

Sažetak

Uvod: Pedobarografija je metoda kojom se kvantificira raspodjela sila na plantarnu površinu stopala tijekom stajanja i hoda. Omogućuje objektivnu procjenu biomehaničke funkcije i patologije stopala, te se sve češće koristi u rehabilitaciji, ortopediji, sportskoj medicini i prevenciji komplikacija, poput dijabetičkog stopala. Pravilna analiza plantarnog pritiska pomaže u identifikaciji rizičnih zona, optimizaciji ortopedskih uložaka i obuće, te donošenju kliničkih odluka temeljenih na kvantitativnim podacima.

Materijali i metode: U ovom preglednom radu sintetizirana je relevantna literatura pretražena u bazama Medline, Cinahl, ProQuest, Scopus i Academic Search Premier u razdoblju 1987. - 2019. god. Korištene su ključne riječi: „pedobarography“, „plantar pressure“, „gait analysis“, „diabetic foot“, „orthotics“ i „rehabilitation“. Uključeni su radovi na engleskom jeziku koji opisuju tehnologije za mjerenje plantarnog pritiska (platformske i in-shoe tehnologije) te smjernice za prevenciju ulkusa dijabetičkog stopala, s naglaskom na ključne parametre mjerenja i predloženi standardizirani protokol. **Rezultati:** Literatura i smjernice potvrđuju važnost pedobarografije u identifikaciji visokorizičnih regija te optimizaciji terapijske obuće i uložaka kod pacijenata s rizikom od ulceracije. Klinički relevantni pragovi za prevenciju uključuju smanjenje vršnog tlaka od $\geq 30\%$ ili održavanje apsolutnog tlaka ispod 200 kPa u kritičnim zonama.

Moderni uređaji kao što su XSENSOR i F Scan pokazuju zadovoljavajuću točnost i pouzdanost za većinu kliničkih primjena, dok suvremene analitičke metode poput statističkog parametarskog mapiranja dodatno povećavaju kvalitetu i interpretabilnost podataka.

Zaključak: Pedobarografija je objektivna, pouzdana i osjetljiva metoda za procjenu plantarnog opterećenja stopala s ključnom ulogom u rehabilitaciji, ortotici i prevenciji dijabetičkih ulkusa. Standardizacija mjernih protokola, validacija među uređajima i integracija s naprednim tehnologijama poput 3D analize hoda i umjetne inteligencije značajno će unaprijediti njezinu kliničku vrijednost i istraživačku primjenjivost.

Ključne riječi: pedobarografija, plantarno opterećenje, analiza hoda, dijabetičko stopalo, ortotika, rehabilitacija

Abstract

Introduction: Pedobarography is a method that quantifies the distribution of forces on the plantar surface of the foot during standing and walking. It enables an objective assessment of the biomechanical function and pathology of the foot, and is increasingly used in rehabilitation, orthopedics, sports medicine and the prevention of complications, such as the diabetic foot. Correct analysis of plantar pressure identifies risk zone, optimize orthopedic insoles and footwear, and making clinical decisions based on quantitative.

Materials and methods: In this review, the relevant literature searched in the Medline, Cinahl, ProQuest, Scopus and Academic Search Premier databases in the period 1987 - 2019 was synthesized. Key words used: “pedobarography”, “plantar pressure”, “gait analysis”, “diabetic foot”, “orthotics” and “rehabilitation”. English-language papers describing plantar pressure measurement technologies (platform and in-shoe technologies) and guidelines for the prevention of diabetic foot ulcers were included, with an emphasis on key measurement parameters and a proposed standardized protocol.

Results: The literature and guidelines confirm the importance of pedobarography in identifying high-risk regions and optimizing therapeutic footwear and insoles in patients at risk of ulceration. Clinically relevant thresholds for prevention include a reduction in peak pressure of $\geq 30\%$ or maintaining absolute pressure below 200 kPa in critical zones. Modern devices such as XSENSOR and F Scan demonstrate satisfactory accuracy and reliability for most clinical applications, while modern analytical methods such as statistical parametric mapping further increase the quality and interpretability of data.

Conclusion: Pedobarography is an objective, reliable and sensitive method for assessing plantar foot loading with a key role in rehabilitation, orthotics and prevention of diabetic ulcers. Standardization of measurement protocols, validation across devices, and integration with advanced technologies such as 3D gait analysis and artificial intelligence will significantly improve its clinical value and research applicability.

Key words: pedobarography, plantar loading, gait analysis, diabetic foot, orthotics, rehabilitation

Uvod

Pedobarografija, odnosno analiza plantarnih tlakova, metoda je kojom se kvantificira raspodjela sila na plantarnu (donju) površinu stopala tijekom statičkih i dinamičkih aktivnosti, uključujući stajanje i hod (1). Ova metoda omogućuje preciznu i objektivnu procjenu biomehaničke funkcije stopala, što je čini izuzetno korisnom u dijagnostici, planiranju terapije i praćenju učinka različitih intervencijskih mjera.

Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća, pedobarografija je prepoznata kao vrijedan dijagnostički i evaluacijski alat u području rehabilitacijske medicine, ortopedije, sportske medicine i preventivne diabetologije. Njena primjena omogućuje vizualizaciju i kvantifikaciju distribucije pritisaka ispod stopala, čime se mogu identificirati visokorizične regije, pratiti biomehaničke promjene kroz vrijeme te evaluirati učinkovitost ortopedskih uložaka, specijalizirane obuče i kirurških zahvata (1 - 4).

Pionirski radovi iz 1990-ih godina (1, 2) postavili su tehničke temelje za mjerenje plantarnog opterećenja, uključujući razvoj ranih mjernih uređaja i protokola za prikupljanje podataka. S vremenom, klinička primjena pedobarografije dodatno je unaprijeđena kroz razvoj međunarodnih smjernica koje definiraju indikacije za primjenu, pragove opterećenja te interpretaciju rezultata (3, 4). Danas se preporuke temelje na dokazima koji podupiru korištenje pedobarografije u svakodnevnoj kliničkoj praksi, osobito u populaciji s povećanim rizikom od komplikacija, poput osoba s dijabetičkom neuropatijom.

Izvan kliničkog konteksta, pedobarografija ima i izrazitu znanstvenu vrijednost. Omogućuje bolje razumijevanje normalne i patološke mehanike hoda, kao i uvid u utjecaj čimbenika poput dobi, tjelesne mase, morfoloških deformiteta, mišićne slabosti i neuroloških poremećaja na dinamiku opterećenja stopala. Posebnu pažnju privukla je njena primjena u prevenciji ulkusa kod osoba s dijabetesom, gdje precizna analiza tlaka omogućuje ciljanje kritičnih zona i optimizaciju terapijske obuče i ortopedskih uložaka s ciljem smanjenja incidencije ulceracija (5, 6). U posljednjem desetljeću, napredak u tehnologiji senzora, obradi biomehaničkih podataka te razvoju računalnih algoritama, uključujući statističko parametarsko mapiranje (SPM), omogućio je izuzetno preciznu, prostorno-vremensku analizu plantarnog opterećenja (7, 8). Time je pedobarografija evoluirala iz pomoćne metode u standardizirani kliničko-istraživački alat koji se uspješno integrira u multidisciplinarna istraživanja i praksu biomehanike hoda.

S obzirom na važnost razumijevanja opterećenja stopala u prevenciji i liječenju brojnih muskuloskeletnih i sistemskih stanja, neophodno je standardizirati protokole pedobarografskih mjerenja, uključujući tehničke uvjete, metode kalibracije, izbor parametara i interpretaciju nalaza. Osim toga, raznolikost dostupnih uređaja i senzorskih tehnologija zahtijeva jasne smjernice za odabir i validaciju opreme u različitim kliničkim i istraživačkim kontekstima. Cilj ovog preglednog rada je prikazati i analizirati dostupnu znanstvenu literaturu o pedobarografiji kao kvantitativnoj metodi za procjenu funkcije i patologije stopala, s naglaskom na njezinu kliničku primjenu u rehabilitaciji, ortotici i prevenciji ulkusa, te predložiti standardizirani protokol mjerenja plantarnih tlakova.

Materijali i metode

Ovaj pregledni rad temeljen je na sintezi dostupne literature. Šest elektronskih baza podataka (Medline, Cinahl, Amed, ProQuest, Scopus, Academic Search Premier) pretraženo je u srpnju 2019. godine. Period pretrage obuhvatio je razdoblje od 1987. do srpnja 2019. godine. U pretraživanju su korištene ključne riječi i njihove

kombinacije: “pedobarography”, “plantar pressure”, “gait analysis”, “diabetic foot”, “orthotics” i “rehabilitation.” Kriteriji uključivanja obuhvatili su radove na engleskom jeziku koji su se odnosili na primjenu platformskih i in-shoe tehnologija u mjerenju plantarnog pritiska te na intervencije obučom i ortopedskim ulošcima kod osoba s dijabetičkom neuropatijom. Nakon provedene selekcije, ukupno 14 radova zadovoljilo je kriterije pretrage i uključena su u analizu. Na temelju odabranih radova prikazane su ključne mjerne varijable (vršni tlak, tlak–vrijeme integral, putanja centra pritiska, kontaktna površina i vremensko-prostorni parametri), uz standardizirani protokol mjerenja za statičke i dinamičke testove, kalibraciju, kontrolu brzine i obradu podataka.

Rezultati

U ovom preglednom radu analizirani su relevantni znanstveni i stručni radovi koji se bave mjerenjem plantarnog pritiska i primjenom pedobarografije u kontekstu dijabetičke neuropatije, biomehanike hoda te kliničke evaluacije funkcije stopala. Poseban naglasak stavljen je na tehnologije mjerenja (platformske i in-shoe sustave), statističke metode obrade podataka (uključujući SPM), kao i na terapijske intervencije poput obuće i ortopedskih uložaka.

U tablici 1 prikazan je sažet pregled analiziranih radova, s jasno izdvojenim temama, autorima, ključnim nalazima i kliničkom primjenom. Rezultati potvrđuju visoku korisnost pedobarografije u prevenciji ulkusa, optimizaciji ortotike te u biomehaničkoj analizi hoda, uz sve veću ulogu suvremenih digitalnih i statističkih alata u interpretaciji podataka.

Tablica 1. Pregled radova o mjerenju plantarnog pritiska i intervencijama kod dijabetičke neuropatije

Tema / Metoda	Autor (ref.)	Ključni rezultat	Primjena
Rocker potplati i ulošci po mjeri	Raspovic A, Landorf KB, Bus SA, et al.	Smanjuju plantarni pritisak; smanjuju rizik od ulkusa	Prevencija dijabetičkog stopala
RFT i pedobarografija	Pataky TC	Statistički rezultati uključivi u rutinske analize	Kvantitativna procjena stopala
Pedobarografsko SPM	Pataky TC, Goulermas JY	Visokorezolutne mape; otporno na položaj stopala	Alternativa regionalnoj analizi
PMD uređaji	Giacomozzi C	Kapacitivni elastomer RMSE <0,5%; TEKSCAN RMSE <2,5%	Validacija i standardizacija mjerenja
Sustavi u obući	PLOS ONE Simonsson S, et al.	Bežični; mjerenje u realnim uvjetima	Procjena utjecaja obuće i uloška
Brzina hodanja i pritisak	Pataky TC, Caravaggi P, et al.	Pozitivna korelacija brzine i vršnog pritiska	Procjena biomehanike hoda
Senzorske tehnologije	Urry S.	Kapacitivne, rezistivne, piezoelektrične, optičke	Odabir sustava prema svrsi
Gojaznost i plantarni pritisak	Birtane M, Tuna H	Potreba za daljnjim istraživanjima	Procjena rizika od ulkusa
Pedobarografija u dijagnostici	Boulton AJM, et al.	Precizna i objektivna procjena	Rehabilitacija, prevencija ulkusa
SPM n-dimenzionalna polja	Pataky TC.	Analiza kontinuiranih podataka	Alternativa diskretnim metrikama
Obuća po mjeri	Bus SA, et al.	Rasterećuje plantarno područje	Terapija za dijabetičko stopalo
Dinamička pedobarografija	Keijsers NLW, Stolwijk NM, Pataky TC	Parametri: vršni, srednji, integral pritiska	Rutinska klinička primjena
Platforme vs. in-shoe	Keijsers NL, Stolwijk NM, et al.	Platforme: visoka rezolucija; in-shoe: realni uvjeti	Laboratorij vs. terenska evaluacija

U prevenciji dijabetičkih ulkusa pokazalo se da rocker potplati i ulošci rađeni po mjeri s metatarzalnim dodacima učinkovito smanjuju plantarni pritisak (6). Razvoj novih analitičkih metoda, poput Random Field Theory (RFT) i pedobarografskog statističkog parametarskog mapiranja (pSPM), omogućio je visoko rezolutnu, automatiziranu i pouzdanu analizu plantarnih tlakova u odnosu na tradicionalne tehnike regionalizacije (7, 8). Pouzdanost mjerenja zavisi od korištenih tehnologija (kapacitivnih, rezistivnih, optičkih), pri čemu su kapacitivni sustavi na bazi elastomera pokazali najveću točnost (9, 10). Platforme nude precizna mjerenja u kontroliranim uvjetima, dok in-shoe sustavi omogućuju kvantifikaciju opterećenja u realnim okolnostima i evaluaciju obuće ili ortopedskih uložaka tijekom svakodnevnih aktivnosti (11 - 14). Pedobarografija se primjenjuje u procjeni utjecaja obuće, brzine hoda, gojaznosti i različitih deformiteta na plantarni pritisak, pri čemu ključni parametri uključuju vršni tlak, tlak-vrijeme integral, kontaktno područje i putanju centra pritiska (13 - 20). Unatoč varijabilnostima među uređajima i nedostatku univerzalnih referentnih vrijednosti, metoda je pokazala visoku osjetljivost i kliničku korisnost u rehabilitaciji, ortotici i prevenciji ulkusa.

Rasprava

Rezultati analiziranih studija potvrđuju sve širu kliničku i istraživačku primjenu pedobarografije kao metode kvantitativne analize plantarnog opterećenja. Najveću vrijednost pokazuje u procjeni učinkovitosti ortopedskih intervencija kod rizičnih populacija, osobito kod osoba s dijabetičkom neuropatijom. Intervencije poput Rocker potplata i ortopedskih uložaka izrađenih po mjeri – osobito onih s metatarzalnim dodacima i visokim stupnjem kontakta sa stopalom – dosljedno pokazuju sposobnost značajnog smanjenja plantarnog pritiska, čime se direktno smanjuje i rizik od ulceracija (6). Ovi nalazi upućuju na važnost individualiziranog pristupa u ortotskoj terapiji, koji nadilazi univerzalna rješenja te zahtijeva preciznu biomehaničku procjenu.

U području statističke obrade pedobarografskih podataka, značajan doprinos donosi Random Field Theory (RFT), koja omogućuje prostorno-kontinuiranu inferenciju i smanjuje potrebu za anatomskim pretpostavkama (7). Tradicionalni pristupi, koji se oslanjaju na podjelu stopala u diskretne regije, podložni su subjektivnim interpretacijama i gubitku informacija. S druge strane, *pedobarografsko statističko parametarsko mapiranje* (pSPM), prilagođeno iz metodologije cerebralne fMRI analize, omogućava automatsku obradu podataka bez potrebe za unaprijed definiranim regijama interesa (8). Ova metoda generira visoko rezolutne statističke karte koje pouzdano reflektiraju funkcionalne promjene stopala, neovisno o varijacijama u položaju stopala prilikom mjerenja.

Validnost i preciznost mjerenja značajno ovise o korištenoj tehnologiji. Najvišu razinu točnosti pružaju kapacitivni sustavi na bazi elastomera (npr. RMSE <0,5%), dok sustavi na bazi zraka pokazuju nešto nižu pouzdanost (9). Iako otpornu tehnologiju (npr. TEKSCAN) karakterizira viša razina kompleksnosti kalibracije, ona također postiže prihvatljive razine točnosti (RMSE <2,5%). Standardizacija mjernih protokola i usporedba uređaja ostaje izazov, ali dostupni podaci podupiru njihovu kliničku primjenjivost u različitim okruženjima. Sustavi za mjerenje pritiska u obući (in-shoe systems) omogućuju praćenje plantarnog opterećenja u realnim, svakodnevnim uvjetima – uključujući dinamiku hoda, duža vremenska razdoblja i različite vrste obuće – što je posebno korisno u evaluaciji učinka terapijske obuće i uložaka (10 - 13). Dodatno, korištenje pSPM u analizi odnosa između brzine hodanja i distribucije vršnog plantarnog pritiska potvrđuje da veće brzine hoda koreliraju s povećanjem vršnih opterećenja na stražnjem i prednjem dijelu stopala (14), što može imati kliničke implikacije pri planiranju terapijskih intervencija. Povećana tjelesna masa (gojaznost) značajno utječe na vrijednosti plantarnog pritiska, osobito u području pete i prednjeg dijela stopala, čime dodatno povećava rizik od oštećenja kože i nastanka ulkusa (16). Zbog toga je prilagodba terapijske obuće kod pretilih osoba ključna komponenta u prevenciji komplikacija. Unatoč varijabilnosti senzorskih tehnologija i odsustvu univerzalno prihvaćenih referentnih vrijednosti, pedobarografija ostaje izuzetno osjetljiva metoda za detekciju biomehaničkih abnormalnosti, procjenu terapijskih učinaka i identifikaciju visokorizičnih područja opterećenja (17,21,22,23). Sustavno praćenje plantarnog pritiska omogućuje ne samo evaluaciju trenutnog stanja, već i predviđanje budućih rizika, što je osobito relevantno u sekundarnoj prevenciji dijabetičkih ulkusa. Kombinacija naprednih statističkih alata (npr. pSPM), individualno izrađenih ortopedskih uložaka i visoko preciznih PMD sustava nudi integriran i precizan pristup analizi plantarnog opterećenja. Ovakav pristup omogućuje dubinsko razumijevanje biomehanike stopala i uvelike doprinosi ranoj intervenciji i prevenciji komplikacija kod rizičnih pacijenata, posebice onih s dijabetičkim stopalom.

Zaključak

Pedobarografija je suvremena, osjetljiva i kvantitativna metoda za objektivnu analizu raspodjele plantarnog opterećenja, s dokazanim kliničkim značajem u rehabilitaciji, ortotici i prevenciji komplikacija poput dijabetičkih ulkusa. Analiza literature pokazuje da individualizirani ortopedski ulošci, terapijska obuća i rocker potplati učinkovito reduciraju vršni pritisak u rizičnim regijama stopala. Uvođenje naprednih analitičkih tehnika, osobito pedobarografskog statističkog parametarskog mapiranja

(pSPM), omogućuje automatsku, visoko rezolutnu i prostorno-kontinuiranu procjenu cijele plantarne površine, čime se nadilaze ograničenja tradicionalnih metoda. Integrirani pristup koji kombinira validirane mjerne sustave, individualizirane intervencije i naprednu obradu podataka predstavlja optimalni okvir za personaliziranu procjenu i terapiju. Daljnji razvoj pedobarografije, uključujući standardizaciju mjernih protokola te integraciju s trodimenzionalnom analizom hoda i umjetnom inteligencijom, potencijalno će dodatno unaprijediti njezinu dijagnostičku i terapijsku vrijednost u kliničkoj praksi.

Literatura

1. Orlin MN, McPail TG. Plantar pressure assessment. *Phys Ther.* 2000;80(4):399–409.
2. Rosenbaum D, Becker HP. Plantar pressure distribution measurements: Technical background and clinical applications. *Foot Ankle Surg.* 1997;3:1–14.
3. Bus SA, Lavery LA, Monteiro Soares M, et al. Guidelines on the prevention of foot ulcers in persons with diabetes (IWGDF 2019 update). *Diabetes Metab Res Rev.* 2020;36(S1):e3269.
4. IWGDF. Guidelines on the prevention of foot ulcers in persons with diabetes. 2023 update. Available from: iwgdfguidelines.org (accessed 2025).
5. Lockhart M, Dinneen SF, O'Keeffe DT. Plantar pressure measurement in diabetic foot disease: A scoping review. *J Diabetes Investig.* 2024;15(8):990–999.
6. Rasovic A, Landorf KB, Bus SA, et al. Footwear and insole design features that reduce neuropathic plantar forefoot ulcer risk in people with diabetes: a systematic review. *J Foot Ankle Res.* 2020;13:30.
7. Pataky TC. Assessing the significance of pedobarographic signals using random field theory. *J Biomech.* 2008;41(11):2465–2473.
8. Pataky TC, Goulermas JY. Pedobarographic statistical parametric mapping: a pixel level approach to foot pressure image analysis. *J Biomech.* 2008;41(10):2136–2143.
9. Giacomozzi C. Appropriateness of plantar pressure measurement devices: a comparative technical assessment. *Gait Posture.* 2010;32:141–144.
10. PLOS ONE. Validity and reliability of the XSENSOR in shoe pressure measurement system. *PLoS One.* 2022;17(12):e0277971.
11. Simonsson S, Tranberg R, Zügner R, Hellstrand Tang U. Reliability of F Scan in shoe plantar pressure measurements in people with diabetes at risk of foot ulcers. *The Foot.* 2023;56:102027.
12. Burnie L, Chockalingam N, Holder A, Claypole T. Testing protocols and measurement techniques when using pressure sensors for sport and health applications: a comparative review. *Foot.* 2024;59:102094.
13. Zwaferink JBJ, Nallet F, Bus SA. In Shoe Pressure Measurements in Diabetic Footwear Practice: Success Rate and Facilitators and Barriers. *Sensors (Basel).* 2024;24(6):1795.
14. Pataky TC, Caravaggi P, Savage R, et al. New insights into the plantar pressure correlates of walking speed using pedobarographic SPM. *J Biomech.* 2008;41:1987–1994.
15. Urry S. Plantar pressure measurement sensors. *Measurement Science & Technology.* 1999;10:R16–R32.
16. Birtane M, Tuna H. The evaluation of plantar pressure distribution in obese and non obese adults. *Clin Biomech.* 2004;19(10):1055–1059.
17. Boulton AJM, Armstrong DG, Albert SF, et al. Comprehensive foot examination and risk assessment: a report of the task force of the foot care interest group of the American Diabetes Association. *Diabetes Care.* 2008;31(8):1679–1685.
18. Pataky TC. Generalized dimensional biomechanical field analysis using SPM. *J Biomech.* 2010;43(10):1976–1982.
19. Bus SA, Waaijman R, Arts M, et al. The effectiveness of footwear and offloading interventions to prevent ulcer recurrence in diabetes: a multicenter randomized controlled trial. *Diabetes Care.* 2013;36(12):4109–4116.
20. Keijsers NLW, Stolwijk NM, Pataky TC. Linear dependence of peak, mean, and PTI values in plantar pressure images. *Gait Posture.* 2010;31(1):140–142.
21. Rao S, Carter S, Wolfe MW. Standardization issues in pedobarography. *Clin Podiatr Med Surg.* 2010;27(4):549–556.
22. Keijsers NL, Stolwijk NM, Louwerens JW, et al. Variability of plantar pressure measurement in daily practice. *Gait Posture.* 2009;29(4):639–643.
23. Bus SA, van Netten JJ. A shift in priority in diabetic foot care and research: prevention of ulcer recurrence is top priority. *Diabetes Metab Res Rev.* 2016;32:99–105.